

Plastic 흡기 매니폴드 모듈 개발에 관한 연구

A study on development of plastic intake manifold module

이정균† · 김영복* · 주경제**

Jeong-Kyun Lee, Young-Bok Kim and Kyung-Jei Joo

Key Words : Turbo Charger, Intake manifold module, Flow path, CFD, Burst Pressure Strength

ABSTRACT

Future powertrain technologies will be developed focused on applications of eco-friendly technology for internal combustion engine, electric vehicle and Fuel Cell Electric Vehicle. But it is expected that these cutting edge technologies will not be applied immediately due to lack of infrastructure, technical and economical reasons. Therefore, numerous developments of internal combustion engine will be carried out for the time being. There have been many turbo engine developments undergoing to maximize the engine performance using turbo charger system in accordance with global trend-green technology and downsizing of engine which coincides with HMC's future development strategy.

This study reviews the development process and result of plastic intake manifold module which is firstly developed for turbo engine. CAE simulation and experiments were implanted to evaluate design validity.

1. 서 론

최근 글로벌 자동차 시장은 친환경 기술, 승객의 안전과 편의, 통신 및 IT기술을 중심으로 발전하고 있는 가운데 미래의 파워트레인 시스템적 측면으로는 내연기관의 친환경기술 적용과 전기차(EV) 및 연료전지차량(FCEV)의 개발이 주요 기술로 진행되고 있다. 그러나 미래의 전기에너지가 화석 연료를 대체하기 위해서는 인프라 구축, 기술적 및 경제적인 측면의 문제점들로 인해 일정기간 소요될 것으로 예상된다. 이에 따라 앞으로도 지속적인 가솔린 및 디젤기관의 개발이 이루어 질 것으로 사료된다. 가솔린엔진 개발에 있어서는 GDI 시스템, 가변흡기밸브 시스템, CVVL 시스템 등의 최신 기술을 접목하여 눈부시게 발전해 왔다.

또한, 엔진의 친환경 및 다운 사이징(Downsizing)

이라는 세계적인 추세와 발맞추어 과급 시스템(Turbo charger system)을 이용하여 흡입 체적 용량을 최대화시켜 엔진을 성능을 극대화한 터보 엔진이 적용된 차량의 개발이 활발해지고 있다.

엔진의 성능향상 측면에서 흡기매니폴드 모듈은 엔진의 성능을 좌우하는 중요한 컴포넌트로서 최근 가변흡기밸브 시스템(VIS)을 비롯한, 가변유동시스템(VCM) 등의 기술을 접목하여 왔으며, 앞으로도 성능 개선을 위한 끊임없는 신기술 개발이 진행되고 있다.

본 연구에서는 최근 가솔린 Turbo GDI 엔진용 흡기 매니폴드 모듈로는 처음으로 개발하여 양산을 시작한 T-car Turbo GDI 엔진용 Plastic 흡기 매니폴드 모듈 개발에 대해서 통합적으로 고찰하고자 한다.

2. 본 론

2.1 흡기 매니폴드의 유동해석

T-car Turbo GDI 흡기 매니폴드 개발 초기의 유동 형상(Airflow path)은 G-car엔진의 흡기 매니폴드와 유사한 Internal Center Feeding Type

† 이정균: BASF KOREA Engineering Plastics 사업부

E-mail : jeongkyun.lee@basf.com

Tel : (031)599-7595, Fax : (031)599-7580

* KEFICO 제품개발팀

** KEFICO 제품개발팀

이었다. 이 방식은 ETC로부터 유입된 공기가 Surge tank 로 이동 후에 Runner 방향으로 급격하게 유동 방향이 변경되는 방식으로 G-car엔진과는 달리 과급 공기가 유입될 때 발생하는 유동저항이 매우 커서 엔진 성능이 저하되는 요인이 되었다.

T-car Turbo GDI 엔진의 성능 저하를 개선 하기 위해 엔진 layout 재검토, design concept 모델의 CFD 및 경쟁사 벤치마킹 등을 통해서 External Center Feeding Type으로 변경하였다. 본 방식은 Turbo charger에서 압축된 공기가 Inter cooler 및 air induction hose를 통해서 ETC로 유입될 때 ETC의 방향을 하향에서 상향으로 변경 함으로써 흡입공기 가 Surge tank를 통과하여 직접 Runner로 유입되는 형태로 공기의 유동저항으로 최대한으로 저감시킬 수 있다.

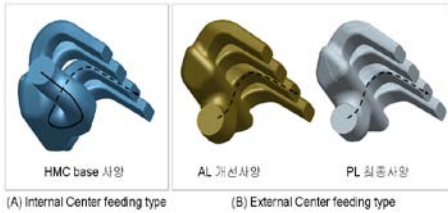


Fig. 1 Air flow path type

흡기매니폴드 내부의 공기 유동해석을 위해 공기유로 (Airflow path)의 3D모델을 이용하여FE model을 생성 한 후 CFD 해석을 실시하였다. CFD해석에는 상용 소프트웨어인 Star-CD Ver. 4.0을 사용하였다.

Fig. 2는 초기 Aluminum 흡기 매니폴드와 Plastic 흡기 매니폴드의 CFD 해석 결과를 보여 주고 있다. Zip tube에서 유입된 흡기 가 Surge tank로의 유동방향의 변경 없이 각 기통으로 유입되는 Plastic 흡기 매니폴드의 유출 속도가 초기 Aluminum 흡기 매니폴드의 유출 속도보다 빠를 수 있었다.

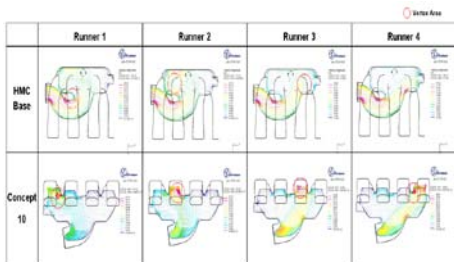


Fig. 2 CFD (Velocity plot result) of Baseline vs. improved concept design

Fig. 3는 초기 Aluminum 흡기 매니 폴드와 Plastic 흡기 매니폴드의 Mass flow rate을 보여 주고 있다.

Plastic 사양 흡기 매니폴드의 Mass flow rate 경우 초기 Aluminum 흡기 매니 폴드보다 약 16% 개선되었다.

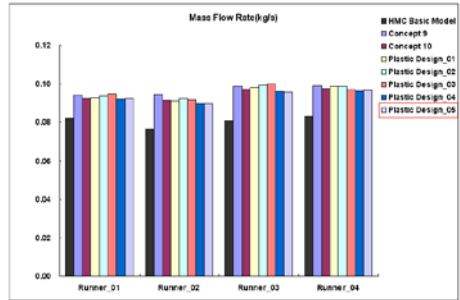


Fig. 3 CFD result of Baseline vs. improved concept design

흡기 매니폴드의 Runner의 길이는 결정하기 위해서 Surge tank 용량 및 Runner의 길이를 변수로 CFD 해석 및 엔진 Layout 검토 후, 초기 모델을 선정하여 Rapid proto sample을 제작하였다.

흡기 매니폴드의 Runner 길이는 엔진성능 시험을 통해서 기존사양의 270mm 에서 약200mm가 최적 사양임이 확인되어 이를 기준으로 상세설계를 실시 하였다.

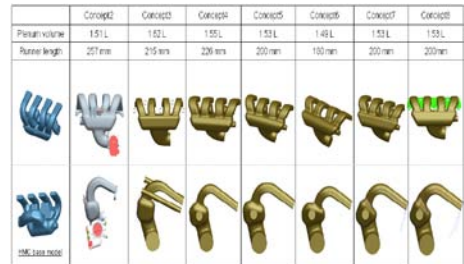


Fig. 4 CFD result of Baseline vs. improved concept design

2.2 Plastic 흡기매니폴드 설계

일반적으로 Plastic 흡기매니폴드 개발은 Fig. 5와 같은 프로세스에 의해 진행된다.

Plastic 흡기 매니폴드는 금형 설계의 꽃이라고 할 정도로 매우 복잡하고 고 난이도의 금형설계 기술이 요구된다.

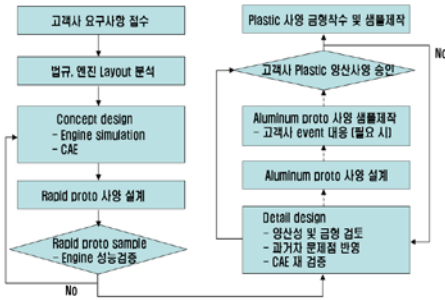


Fig. 5 General development process of Plastic intake manifold

T-car Turbo GDI 흡기 매니폴드는 협소한 엔진 layout내에서 형상이 구현되어 있어 Runner 및 Zip Tube의 유로가 급격히 구부러져 있는 것이 특징으로 일부 Shell의 금형 구조가 매우 복잡하여 상대적으로 양산성에 유리한 금형구조개선을 위해 Port flange와 ETC flange를 각각 서로 다른 Shell에 위치시켜 금형 구조를 개선하였다.

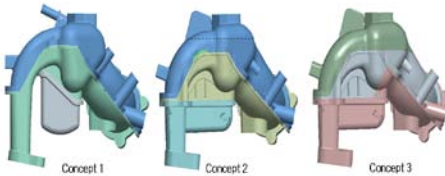


Fig. 6 Plastic intake manifold shell split study

이러한 문제를 해결하기 위해 Fig. 6의 검토 안에서 Concept2가 가장 적절한 것으로 판단되어 이를 기준으로 Plastic 흡기 매니폴드를 설계하였다.

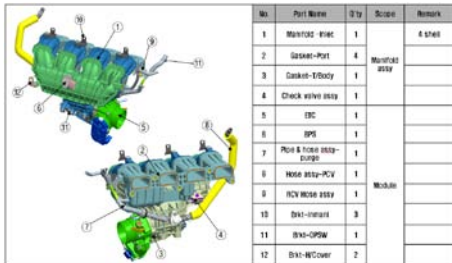


Fig. 7 T-car Turbo GDI Intake manifold module

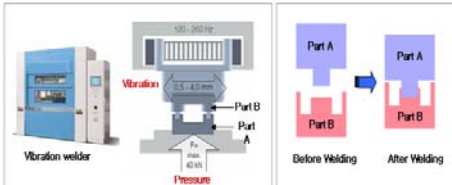


Fig. 8 Vibration welding method

Plastic 흡기 매니폴드 제작에는 여러 가지 방법이 있으나, 보편적으로는 PA6 재질의 Shell을 사용한 후에 이들을 Vibration welding 방식으로 접합하여 공기유로를 생성하는 방식을 사용하고 있다. 각 Shell간의 접합을 위해 weld bead을 생성한 두 개의 shell을 welding fixture에 안착한 후 Vibration welder에서 상하 방향으로 압력을 가한 상태에서 한 방향으로 진동마찰을 인가하게 되면 접촉부가 마찰열에 의해 용융되어 두 개의 Shell이 결합하게 되는 용착 기술이 적용되었다.(Fig. 8)

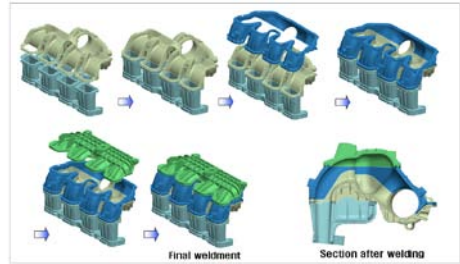


Fig. 9 Vibration welding process

Fig. 9는 Plastic 흡기매니폴드의 Vibration welding제작 프로세스를 보여주고 있다. Plastic 흡기 매니폴드는 여러 Shell을 접합하여 제작하기 때문에 접합부의 Burr 혹은 공기유동방향의 역단차가 발생할 수 있으며 이는 엔진 성능에 치명적인 영향을 끼치게 되므로 중점 관리항목으로 주의가 요구되고 있다. (Fig. 10)

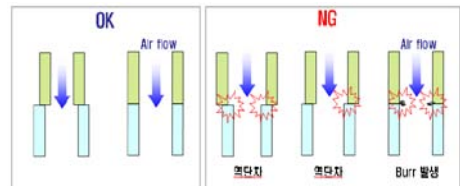


Fig. 10 Vibration welding quality

2.3 Burst pressure strength 해석

일반적으로 흡기엔진에서는 엔진 Idle 시 흡기 매니폴드 내의 부압이 가장 크게 생성되는데 반해서 Turbo 엔진에서는 Idle~약 1,700RPM 구간의 Turbo lag 구간 이후에 급격하게 압력상승이 발생되며, 최대 RPM 구간 까지 거의 일정한 압력으로 분포하고 있다. 실제 사용영역에서 WOT까지 흡기 매니폴드의 내부 압력은 통상 2.2Bar이하지만 일반적으로 국내의 완성차 업계에서 요구하는 내압 강도는 대략 8~8.5Bar 수준이다.

이것은 Turbo 엔진의 특징인 흡기 매니폴드 내의 높은 압력 외에도 엔진의 예상치 못한 역화 (Backfire)에 의해 Surge tank 내의 압력이 급격히 상승할 경우 Plastic 사양의 흡기 매니폴드의 직접적인 손상이 발생 될 수 있기 때문이다.

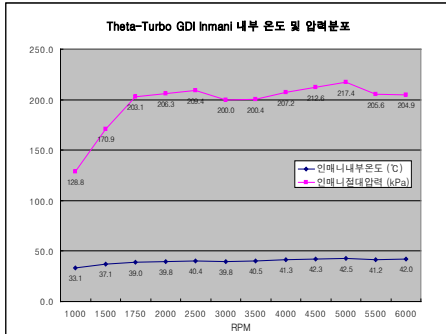


Fig. 11 Pressure and temperature distribution of Intake manifold module for T-car Turbo GDI

이러한 역화 압력을 실차 상태에서 측정하기에는 여러 가지 어려움이 있어 이를 모사하기 위한 시험 장비가 사용되고 있다. 타사에서 행해진 실험에 의하면 직렬 4기통 엔진의 경우 역화 압력은 대략 5.2~6.2 Bar 수준으로 평가된다. (Fig. 12)

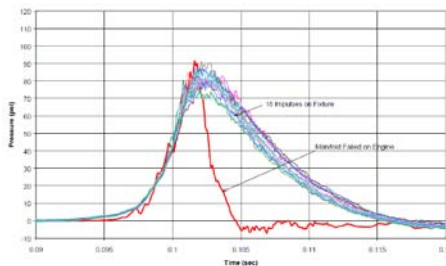


Fig. 12 Estimation of backfire pressure

Turbo엔진의 환경을 고려하여 보다 높은 신뢰성 확보를 충족시키기 위해서 T-car Turbo GDI 흡기 매니폴드는 10Bar 이상을 목표로 내압 강도 CAE 해석과 시험을 진행하였다.

플라스틱 흡기매니폴드의 내압강도 CAE해석은 상용소프트웨어인 Hyperworks ver.10 과 Abaqus ver. 6.10을 이용하여 해석을 진행하였다.

CAE 해석은 전 단계에서 설계된 Plastic 흡기 매니폴드 모델을 이용하여 경계조건으로 엔진 장착부인 고정부와 주요 부품에 의한 하중을 반영한 후 내부의 압력을 인가하여 각 부분에서 발생하는 응

력과 변형을 예측하였다. 이후 취약 부위에 대해서는 weld bead, shell 두께, Rib 등을 수정, 보강하여 추후 발생할 수 있는 문제점을 사전에 방지하였다.

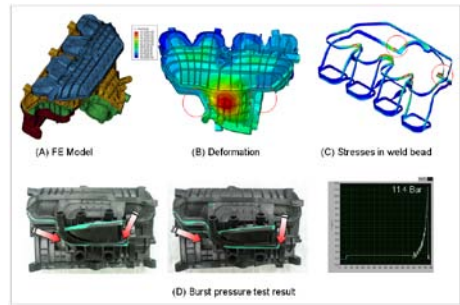


Fig. 13 CAE results of burst pressure strength and burst pressure test result

Fig. 13는 CAE Burst pressure 해석과 Burst pressure 시험을 통 내부 압력이 10bar 시 파손 예상부위 및 응력, 변형량 등을 보여주고 있다.

Burst pressure 시험을 통해서 검증한 사례로써 파손 진진 경향과 내압강도 등이 CAE 예상 결과와 유사함을 보였다. 특히 Surge tank 와 Zip tube 연결부위에서 발생한 파손은 화살표 방향으로 진진 되었다. 시험에서 확인된 내압 강도는 약10~11.5 Bar 수준이었다.

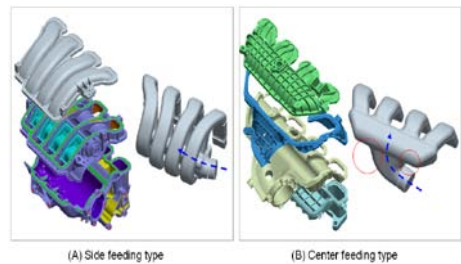


Fig. 14 Comparison of side feeding type and center feeding type intake manifold

흡기 매니폴드에는 Cylinder의 각 흡기 Port로 유로 생성을 위해서 Runner별 일정한 수준으로 균일한 Weld bead가 반영된다. 이런 Runner 주변의 Weld bead와 내부 Shell 구조가 보강 Rib의 역할을 하게 되어 Runner 내부에 인가되는 압력이 Surge tank 및 Zip tube부위에서 받는 수준보다 낮아 Runner 부위에서는 파손 발생이 낮은 편이다.

반면, Surge tank 및 Zip tube부위는 체적대비 Weld bead에서 인가되는 압력수준이 매우 높아

역화 혹은 Burst pressure 시험 시에 파손 발생 가능성이 높다. 이것은 내부 압력에 의한 Surge tank 중앙부위 변위가 가장 크게 발생되면서 Surge tank 및 Zip tube 주변 Weld bead에 응력이 집중되어 파손이 발생된다.

T-car Turbo GDI 흡기매니폴드의 경우 center feeding 방식은 Surge tank와 Zip tube이 연결 부위가 상대적으로 크고 급격하게 구부러진 형상을 가지고 있기 때문에 Side feeding 방식의 흡기 매니폴드보다 Burst pressure 성능 측면에서 불리하므로 강성보강을 위해 Rib, 국부적 두께 증가 등의 대안이 요구된다.

2.4 Vibration 거동 해석

흡기매니폴드 모듈이 엔진 실린더헤드에 장착 되었을 경우 공진 특성을 파악하기 위해 아래와 같이 상용소프트웨어인 Hyperworks ver.10 과 Abaqus ver. 6.10을 이용하여 해석을 진행하였다.

Fig. 15과 같이 엔진의 장착면인 실린더 헤드와 흡기 매니폴드 모듈 고정을 위한 Stay Bracket을 구속 조건으로 하고 체결 부품 중 ETC의 중량을 Lumped mass로 반영하였다.

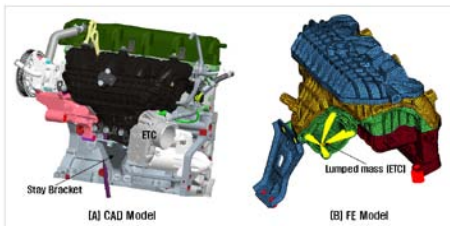


Fig. 15 Boundary conditions for CAE Analysis

직렬 4기통 엔진의 경우 Fig. 16와 같이 각 RPM 영역에 따라 엔진 연소 폭발에 따른 공진 주파수가 발생한다. 엔진에 장착하는 흡기 매니폴드 모듈의 경우 이러한 공진 주파수에 직접적으로 영향을 받아 특정 부품이나 시스템 자체에 파손이 발생할 수 있게 된다. 따라서 흡기 매니폴드의 고유 주파수를 엔진의 공진 주파수영역 이외로 이동시키거나 주파수 레벨을 감소하는 것이 필요하다.

RPM	750	2000	3000	4000	6000	6500
# of Explosion/cylinder (RPM/2)	375	1000	1500	2000	3000	3250
# of Explosion/ RPM	1500	4000	6000	8000	12000	13000
Resonance freq. Hz (# of explosion/sec)	25	67	100	133	200	217

* Based on Inline 4 engine

Fig. 16 Resonance frequency of I-4 engine

초기 개발 단계의 Stay bracket은 엔진이 6,000 rpm일 경우 발생하는 1차 공진 주파수(198Hz)의 영향을 받을 수 있는 가능성 높아서 흡기 매니폴드의 강성 보강을 위해서 흡기 매니폴드의 ETC부위 보강 Rib를 추가하였으나, 개선되지 않아서 Stay bracket의 형상변경을 통한 개선이 요구되었다.



Fig. 17 Stay bracket design

이에 따라 Fig. 17과 같이 Stay bracket 개선모형을 흡기 매니폴드에 결합하여 CAE 진동해석을 실시하였다. 이 결과를 근거로 Stay Bracket 설계변경을 진행하였다.

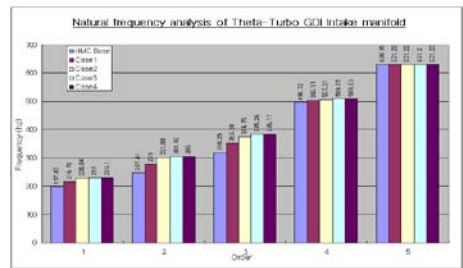


Fig. 18 Natural frequency analysis of T-car Turbo intake manifold module with stay bracket

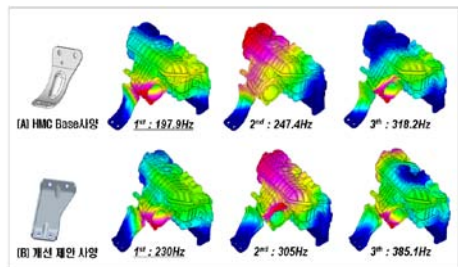


Fig. 19 Natural frequency mode shapes in accordance with stay bracket

Fig. 18~Fig. 19는 Plastic 흡기매니폴드의 진동 해석 결과로 Bracket 형상을 변경하여 기존의 1차 고유 진동수(198Hz)를 230Hz로 증가시켜 문제가 예상되었던 엔진 내구시험과 차량시험에서 개선효과를 확인할 수 있었다. 또한, 최종 Bracket 사양은

Bracket의 양 측면에 보강된 Rib bending 형상으로 엔진의 진동방향인 Z방향의 변위를 감소시킴으로써 흡기매니폴드의 Z방향 진동을 보완할 수 있었다.

3. 결 론

본 연구를 통하여 아래와 같은 결과를 얻었다.

(1) T-car Turbo GDI 엔진용 흡기 매니폴드의 개발에 있어 초기 사양인 Internal center feeding 방식의 공기유동의 경우 ETC 입구단에서 유입되는 흡입공기의 흐름이 External center feeding 방식에 비해 압력손실과 속도손실이 큼을 CFD해석을 통해 확인 하였으며, 엔진 성능시험으로 검증하여 최종 양산 모델로 선정하였다.

(2) Center feeding 방식의 흡기매니폴드는 Surge tank와 Zip tube의 내부 압력 하중에 의해 변형이 Side feeding 방식의 흡기매니폴드보다 상대적으로 커서 내압성능에 취약한 점이 있으며 이는 Weld bead, Rib보강, Shell 두께수정 등을 통해서 개선 할 수 있었다.

(3) 흡기매니폴드 모듈의 공진에 의한 파손을 예방하기 위해서 Sub부품 설계 변경안을 제시함으로써 제품 내구성 향상과 엔진진퇴성을 동시에 개선할 수 있는 계기가 되었다.

(4) 개발 초기 기본사양에 비해 최적화한 T-car Turbo GDI Plastic 흡기매니폴드 개발을 통해 성능을 만족시킬 수 있었다.

참 고 문 헌

(1) The 10th Hyundai-Kia International power-train conference, pp. 108-116.

(2) Heo, S. J., Kim, C. M., Chung, Y. S. and Lee, Y. S., 1998, Vibration Design and Analysis of Plastic Intake Manifold, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 166~172.